Proceedings of 5º Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, IEEE, October 19-20, 1999, Montevideo, Uruguay

INFLUENCIA DE LA POSICION DE LOS ELECTRODOS AUXILIARES EN LA MEDIDA DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

M Andrade, Senior Member IEEE
Montevideo Uruguay

Resumen: La medida de la resistencia de puesta a tierra es una de las tareas comprendida en la recepción de obra de muchas instalaciones y es también realizada en forma periódica como parte del mantenimiento de las instalaciones. Frecuentemente debe medirse la resistencia de puesta a tierra en instalaciones extensas. En estos casos los valores a medir son bajos, del orden de un ohm, o menores. Esta situación es normal en subestaciones de trasmisión o distribución y en instalaciones industriales donde se utilizan tierras únicas para los distintos servicios eléctricos de la instalación.

El método recomendado es el de caída de potencial. Sin embargo los errores de medida que se cometen pueden ser importantes dependiendo de la ubicación de los electrodos y de su separación. Esta situación es particularmente importante en algunos tipos de terrenos no homogéneos, de mayor resistividad en capas profundas que en las capas superficiales.

Se estudian los errores cometidos para distintas ubicaciones relativas de los electrodos auxiliares de tensión y corriente para terrenos modelados por dos capas horizontales de distinta resistividad. Se considera además el acoplamiento inductivo entre los conductores de tensión y corriente debido a las grandes distancias que deben utilizarse frecuentemente para lograr reducir el error de la medida.

Se propone un método que permita ejecutar las medidas utilizando distancias entre electrodos menores y calculando valores de corrección.

Palabras clave. Puesta a tierra, resistividad, resistencia, medida, impedancia, acoplamiento inductivo

I INTRODUCCION

Definición de parámetros a utilizar.

Lp	distancia del electrodo de tensión al centro de la malla
Lc	distancia del electrodo de corriente al centro de la malla
L	largo equivalente de la malla
d	profundidad de la malla
ρ1	resistividad capa superior
ρ2	resistividad capa inferior
k	coeficiente de reflexión (ρ2-ρ1)/(ρ1+ρ2)
h	profundidad de la segunda capa
δ	$503\sqrt{(\rho1/f)}$
R	Resistencia a medir
Rm	resistencia mutua entre la malla y el electrodo de corriente

Los métodos de medida de resistencia de puesta a tierra de electrodos relativamente extensos presentan un conjunto de problemas prácticos de difícil solución. Los mismos están relacionados principalmente con la distancia necesaria entre las instalaciones a medir y los electrodos auxiliares de corriente y tensión. El método universalmente utilizado es el de caída de potencial. También se utiliza con frecuencia el método del 62% [4],[5].

Para la medida se inyecta una corriente alterna I, de frecuencia f entre la instalación a medir M y un electrodo auxiliar de corriente C. Se mide la diferencia de potencial V entre las instalaciones a medir y el electrodo auxiliar de tensión P, para varias localizaciones del electrodo de tensión. (Figura 1). La frecuencia de la fuente para la medida debe ser próxima a la frecuencia industrial de trabajo para que su influencia en las impedancias sea similar a la que ocurre durante un defecto.

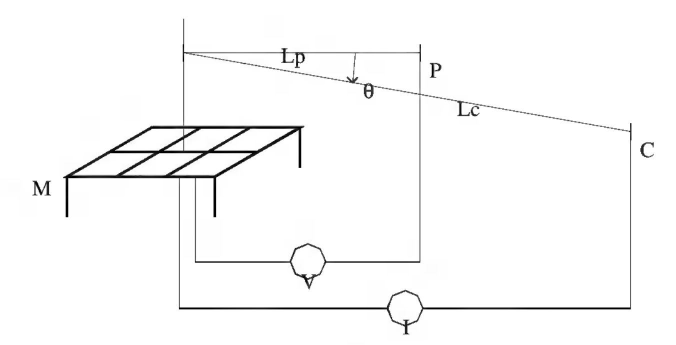


Figura 1 Conexionado para medida de Resistencia de puesta a tierra, definición de distancias Lc y Lp

Al utilizar este procedimiento, el valor del potencial que adquiere la malla para corriente unitaria es menor que el correspondiente a la resistencia de puesta a tierra del electrodo que se desea medir, esto es debido a la resistencia mutua con el electrodo auxiliar de corriente.

De esta forma, aunque se llevara el electrodo (P) a una distancia infinita de la malla igualmente existiría un error debido al que en realidad se estaría midiendo un valor igual a la resistencia a medir menos la resistencia mutua de los dos electrodos. Lo que implica que también deberá alejarse el electrodo C a una distancia muy grande (mayor que 50 veces las dimensiones de la malla).

Si colocamos el electrodo P a una distancia práctica, existirá un error adicional debido a que el potencial del electrodo C, por no corresponder a una tierra remota no es nulo. Sin embargo existe un conjunto de puntos del plano para los cuales el valor de V/I medido es igual al valor de la

resistencia de puesta a tierra. Estos puntos forman una curva cerrada alrededor del electrodo C, la forma de ésta depende de la configuración geométrica del electrodo a medir y del tipo de terreno, si se trata de terrenos no homogéneos.
Uno de estos puntos se encuentra en el segmento de recta que une el electrodo a medir y el electrodo auxiliar de corriente. Si se considera que ambos electrodos son semiesferas, el punto en que V/I es igual a la resistencia de puesta a tierra se encuentra en la línea que une los centros y a una distancia tal que Lp/Lc es igual a 0.618.

De este resultado surge el conocido método denominado del 62%, y el procedimiento de medida consiste en ubicar el electrodo P en la línea que une el electrodo C con el "centro" del electrodo a medir a una distancia de éste igual al 62% de la distancia Lc. Este procedimiento que es solamente válido en forma teórica, se utiliza generalmente en la práctica realizando varias medidas en el punto 62% y mientras se aleja el electrodo C entre medidas hasta que el valor obtenido sea aproximadamente constante. En este caso el alejar el electrodo C tiene como objetivo que el perfil de potencial al alejarse de la malla se aproxime al de un electrodo de forma semiesférica.

El método de caída de potencial es el más utilizado y es el recomendado por los standars de IEEE [1]. La edición 1983 de la Standard IEEE 81 resalta que se debe realizar la gráfica del valor de la resistencia V/I, para P en la recta que une C con el centro de la malla a medir y en función de la distancia a este electrodo. El valor donde esta curva se nivela es tomado como el valor de la resistencia a medir. También se menciona la realización de medidas en la dirección opuesta, admitiendo la existencia de un error permanente.

La norma IEEE 81.2 [2] considera particularmente la medida para instalaciones con valores de resistencia de puesta a tierra menores que 0.5 Ω. Es de destacar, como se señala en la norma, que para estos valores se trata de impedancias de puesta a tierra, no solamente resistencia de puesta a tierra. En este caso propone, dado los largos de conductores de medida a utilizar, la ejecución de medidas en una dirección perpendicular a la de la línea de corriente, esto es a los efectos de minimizar las tensiones inducidas en los conductores de tensión debida a la inductancia mutua con los conductores de corriente. La norma 81.2 destaca que para obtener una resistencia medida con un error menor al 5% debe establecerse una distancia entre el centro de la malla a medir y el electrodo de corriente de al menos 6.5 veces la longitud máxima de la malla.
Sin embargo si se consideran suelos no homogéneos, por ejemplo representados por dos capas horizontales la distribución de corriente varía considerablemente respecto a un terreno homogéneo. En particular, para coeficientes de reflexión positivos la corriente tiende a circular por la capa superior a mayor distancia de la malla, por lo que las distancias necesarias son bastante mayores, en especial a medida que el coeficiente de reflexión se aproxima a 1 [3].

II UBICACIÓN DE LOS ELECTRODOS DE MEDIDA

Se han realizado un conjunto de cálculos a los efectos de poder estimar cual es el mejor punto para realizar la medida, entendiéndose por tal, aquel que tenga menores errores, incluida la influencia por acoplamiento inductivo entre los conductores de corriente y tensión.Otros factores que influyen como el ruido eléctrico existente, fundamentalmente a frecuencia industrial, los métodos de medida específicos para resolver este problema no serán considerados ya que son comunes para cualquiera de las formas en que se decida medir.

Los cálculos han sido realizados utilizando un programa basado en el método de imágenes [6], [7], [8], [9] y el procedimiento utilizado consiste en calcular la resistencia de la malla a medir y posteriormente obtener los potenciales que se medirían en el electrodo de tensión, mientras se simula la circulación de corriente entre la malla y el electrodo auxiliar de corriente.

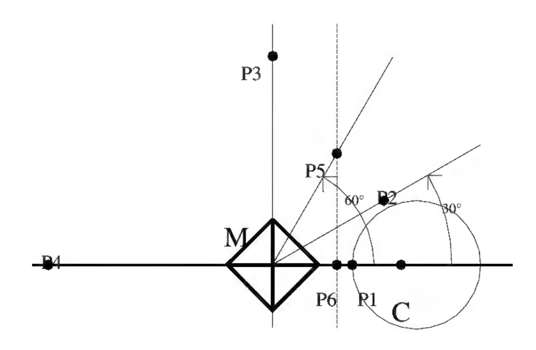


Figura 2 Ubicación de los electrodos de medida que se utilizan en los cálculos. Representación de curva de medida de resistencia real.

Este electrodo ha sido simulado como una pequeña jabalina de 0.5m de largo, 0.035m de diámetro y cuyo extremo superior se encuentra enterrado 0.25m por debajo de la superficie del terreno. De estos valores se calcularon los errores de medida para cada uno de los siguientes puntos de ubicación del electrodo de tensión (Figura 2):

- Punto P1, Lp=0.62Lc, θ=0
- Punto P2, Lp=Lc, θ=30°
- Punto P3, Lp=Lc, θ=90°
- Punto P4, Lp=Lc, θ=180°
- Punto P5, Lp=Lc, θ=60
- Punto P6, Lp=0.5Lc, θ=0

Se estudiarán los errores teóricos cometidos para distintos tipos de terrenos, para lo cual se supondrá que el coeficiente de reflexión "k" varía entre -0.9 y +0.9. Se considerarán en este trabajo profundidades de la segunda capa próximas a las dimensiones de la malla, debido a que los cálculos han mostrado que es en éstas profundidades donde los errores son mayores.

Se definirá una distancia equivalente "L" para cada malla que de alguna manera de una idea de la extensión de la misma. Estas distancias serán indicadas más adelante en cada tipo de malla seleccionado.

A medida que la distancia a la que se encuentra la segunda capa aumenta a varias veces el valor L, o disminuye a valores pequeños respecto a L el terreno se aproxima a un terreno homogéneo. De esta forma se estudiarán variaciones de (h-d)/L entre 0.5 y 1.3. Se considerarán dos distancias Lc=3.5L y Lc=6.5L.

La norma IEEE 81 considera el método del 62% y estudia la variación de la ubicación del punto de medida de resistencia exacta en el segmento que une el electrodo de corriente y la malla en función de k y h para dos electrodos semiesféricos.

En este caso se analizará el error cometido si se aplicara este método dependiendo del tipo de malla, de la separación del electrodo auxiliar de corriente y del tipo de terreno. Se realizan los mismos cálculos para los restantes puntos P seleccionados a los efectos de estimar los errores reales que se cometen durante la medida y para investigar si alguno de los puntos es preferible a otro.

También se estudian algunas formas donde la selección del punto centro de la subestación no es evidente, ya que se consideran para los cálculos formas geométricas de mallados similares a los utilizados en la práctica y por lo tanto diferentes a un electrodo semiesférico.

Si se representan gráficamente los perfiles de potencial a medir sobre la superficie del terreno y se traza una recta horizontal que represente el valor teórico de la resistencia a medir, los puntos no presentan particularidades geométricas específicas que permitan determinarlos al trazar la curva en el campo. Esto es porque el valor de resistencia teórico representado no refleja ningún punto particular en los perfiles que aparecen con la configuración en que se ejecuta la medida, sino que responden a otra configuración (donde la corriente circula entre el electrodo a medir y un electrodo situado a distancia infinita).

Se ha considerado una alternativa consistente en medir el valor exacto del potencial de la malla en las circunstancias en que se realiza la medida Este valor corresponderá a la resistencia de la malla menos la resistencia mutua con el electrodo de corriente. Posteriormente mediante un cálculo basado en medidas adicionales, se agregaría el valor de la resistencia mutua.

De esta forma en la curva de potenciales los puntos de corte representan puntos singulares, por ejemplo el punto sobre la recta de unión del electrodo a medir y del electrodo auxiliar de corriente es para este caso de 0.5 en lugar de 0.618 y coincide además con un punto de cambio de concavidad de la curva, por lo que es sencillo realizando un conjunto de medidas descubrir el cambio de signo de la derivada segunda.

La curva que representa el valor a medir en este caso no es una curva cerrada alrededor del electrodo de corriente, sino que es una recta perpendicular a la recta que une el centro de la malla y el electrodo de corriente, pasando por el punto medio de ese segmento.

De esta forma para realizar una medida a distancia Lp=Lc se debe utilizar un ángulo θ de 60° en lugar de 30°.

III MALLADOS A ESTUDIAR

Se han considerado tres mallas simétricas, que permiten que se determine de forma obvia el centro de la misma y que además abarquen casos extremos desde el punto de vista de combinar una malla plana con un conjunto de jabalinas.

Los esquemas elegidos se indican en la figura 3 y consisten en:

- Jabalina de 30 m de largo cuyo extremo superior se encuentra a 0.5 m de profundidad y cuyo diámetro es 0.016m (3a)
- Mallado de 2x2 mallas, con 30 m de diagonal, conductores de 0.01m de diámetro y enterrada a 0.5 m de profundidad (3b)
- Mallado de 2x2 mallas, con 30 m de diagonal, conductores de 0.01 m de diámetro, enterrada a 0.5 m de profundidad y 4 jabalinas en los vértices de 30 m de largo, 0.016 m de diámetro (3c).

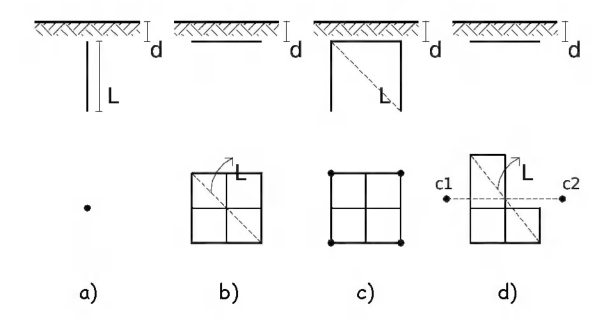


Figura 3 Forma de los electrodos que se estudiarán y definición de la distancia "L" para cada uno de ellos.

IV ERRORES DEPENDIENTES DE LA UBICACIÓN DE LOS ELECTRODOS DE MEDIDA

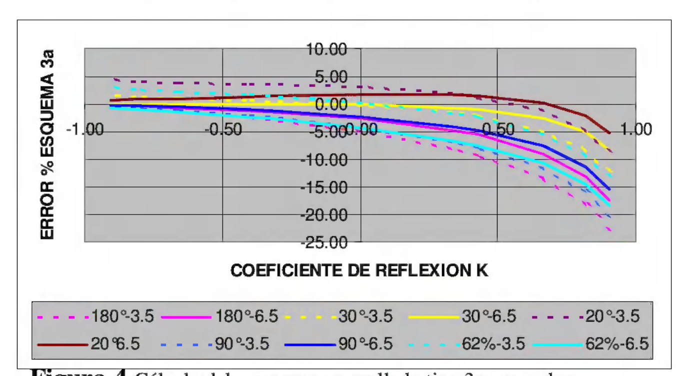


Figura 4 Cálculo del error para un mallado tipo 3a, para dos distancias de separación del electrodo de corriente 3.5L y 6.5L y para distintos puntos del electrodo de tensión, en función del coeficiente de reflexión k.

En las figuras 4, 5 y 6 se representan un conjunto de curvas donde se ha representado el error que se cometería en la medida para las ubicaciones del electrodo P mencionadas, para dos ubicaciones del electrodo C: 3.5L y 6.5L y para una profundidad de la segunda capa igual a la distancia L.
En abscisas se ha considerado el valor del coeficiente de reflexión. Las gráficas se han realizado respectivamente para los esquemas de mallas seleccionados en la Figura 3a, 3b y 3c.

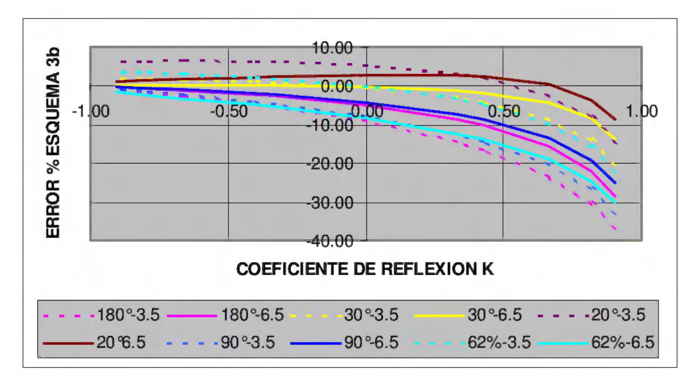


Figura 5 Cálculo del error para un mallado tipo 3b, para dos distancias de separación del electrodo de corriente 3.5L y 6.5L y para distintos puntos del electrodo de tensión, en función del coeficiente de reflexión k.

Como se describe en detalle en el análisis siguiente realizado para cada punto de ubicación del electrodo de tensión los errores mayores aparecen para terrenos cuya capa superior es más conductora que la inferior, esto es porque la circulación de corriente por la capa superior se extiende más que en otro tipo de terreno. Esta situación hace que para disminuir el error se deban alejar más los electrodos. Las mismas circunstancias hacen que el diseño de la malla sea más extenso en superficie si la capa superior es más conductora. En efecto, aunque generalmente las dimensiones del mallado están relativamente acotadas por el terreno, las soluciones de diseño hacen que para terrenos con capas inferiores más conductoras se tienda a colocar jabalinas profundas aumentando la circulación de corriente en vertical.

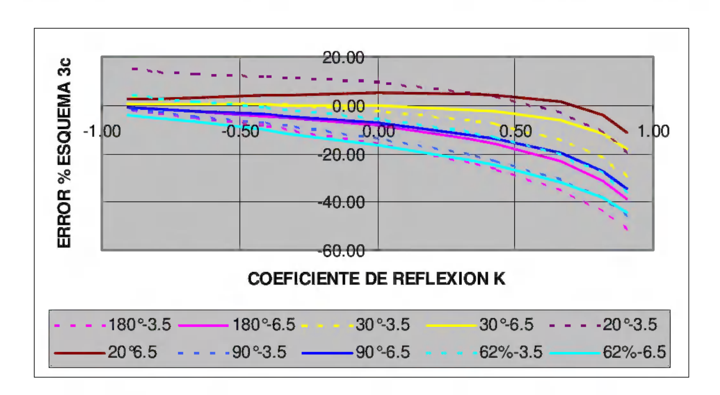


Figura 6 Cálculo del error para un mallado tipo 3c, para dos distancias de separación del electrodo de corriente 3.5L y 6.5L y para distintos puntos del electrodo de tensión, en función del coeficiente de reflexión k.

En cambio cuando la capa superior es la más conductora se utilizan frecuentemente electrodos largos horizontales como contrapesos.

Estas consideraciones respecto al tipo de diseño hacen que para terrenos con capas superiores más conductoras las dimensiones superficiales sean mayores que las que se considerarían para el caso contrario (k<0) aumentando la longitud "L" en la superficie del terreno y por lo tanto aumentando la dificultad de la medida.

A continuación se analizarán más detalladamente que sucede con cada uno de los puntos seleccionados para ubicación del electrodo de tensión.

A ERRORES COMETIDOS PARA MEDIDAS A 90°

El error de medida para una separación del electrodo de corriente puede ser mayor que 5% aun para terrenos homogéneos, dependiendo del tipo de mallado, es menor que 5% para los esquemas 3a y 3b, pero llega a 8% para un esquema 3c. Los errores cometidos varían considerablemente con el tipo de terreno considerado, fundamentalmente con el coeficiente de reflexión. También varían con la profundidad de la segunda capa. En los casos estudiados, que están próximos a los puntos de mayor error, la variación de éste con esta distancia es leve, pero se ve claramente que la variación depende de la configuración de la malla, para un esquema tipo 3a o 3c, con jabalinas profundas el máximo error está próximo a (h-d)=L, pero para un mallado plano, sin jabalinas como el 3b el máximo es para un valor próximo a (h-d)=0.6L.

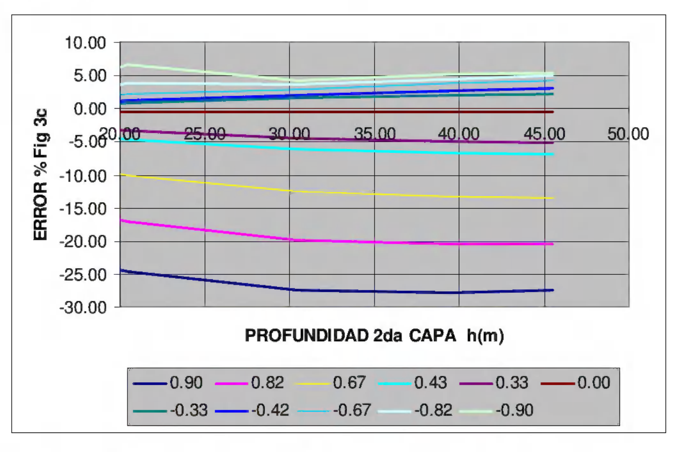


Figura 7 Error teórico para medida del ejemplo 3c en función de la profundidad de la segunda capa y parametrizado en el valor del coeficiente de reflexión

El error máximo cometido para k= 0.9 y (h-d)=L, para los esquemas 3a, 3b y 3c, con Lc=6.5L, es de 15, 25 y 35 % respectivamente, lo que demuestra la existencia de errores importantes aun para esta separación de electrodos.
Si la separación con el electrodo es menor (3.5L) y utilizando este mismo procedimiento de medida los errores alcanzan hasta 12% para un terreno homogéneo y 20, 32 y 45% para un terreno con coeficiente de reflexión 0.9. Por otra parte si el terreno se representa mediante un coeficiente de reflexión negativo los errores disminuyen considerablemente.

B ERRORES COMETIDOS PARA MEDIDAS A 180°

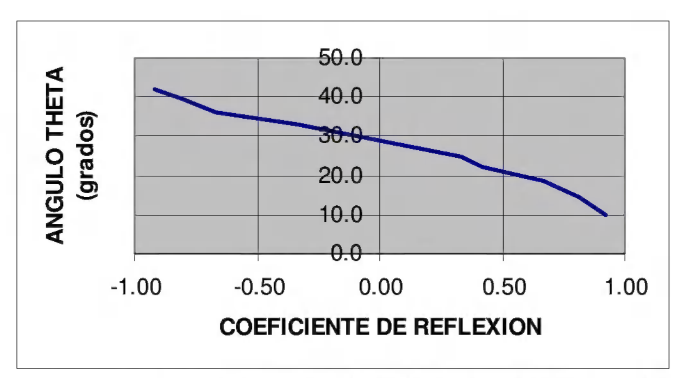
Los errores cometidos para medida a 180° son similares a los cometidos para medidas a 90° pero levemente mayores; cerca del 5% en el peor caso, y apenas mayores al 1% para terrenos homogéneos.

C ERRORES COMETIDOS PARA MEDIDAS AL 62%

La norma IEEE 81.1 especifica que existe una importante desviación del punto de medida de resistencia real respecto al punto del 62%. Sin embargo no especifica que error se comete si de todas formas se realizan las medidas utilizando el punto 62%. Estas variaciones son debidas fundamentalmente a dos causas, geometría de la malla, y tipo de terreno.

Para los casos estudiados se encontró que para distancias de 6.5L el error cometido es sustancialmente mayor que para 3.5 L. Los errores cometidos para medidas a 3.5L son para los mallados a y b menores que los cometidos con la medida a 90° y distancia de 6.5L. Por consiguiente, son mucho menores que los cometidos para esa misma dirección de medida y distancia Lc=3.5L. Esta conclusión es válida aun para terrenos uniformes, donde las medidas son menores para el método del 62%, medido a 3.5L que el método de medir a 90° y 6.5L. Sin embargo de utilizar las medidas al 62% crecen considerablemente si se alejan los electrodos a 6.5L, siendo mayores que las medidas realizadas a 90°.

Estas consideraciones hacen que solamente sea aconsejable utilizar este método si se realiza un cálculo previo considerando la separación de los electrodos a utilizar y la configuración de la malla. El tipo de terreno influye de manera similar a las restantes ubicaciones del electrodo de potencial.



D ERRORES COMETIDOS PARA MEDIDAS A 30° y 20°

Los errores menores ocurren si se realizan las medidas utilizando una distancia P igual a C y con un ángulo aproximado a los 30°. En este caso los errores pasan a ser aproximadamente cero para terrenos homogéneos y llegan a valores máximos de 20% (en lugar de 50%) para coeficientes de reflexión de 0.9 en el ejemplo de la figura 3c. (Hay que considerar que este punto, como veremos más adelante, presenta errores de acoplamiento mayores).

Los errores disminuyen considerablemente si se elige un ángulo de 20°, con lo que los errores máximos cometidos para cualquier terreno son del 10%.

Los errores cometidos para terrenos homogéneos son del orden del 5% en valor absoluto, pero a diferencia de la medida a 90° se trata de un error positivo en lugar de negativo, por lo que por un lado compensa los errores de acoplamiento y por otro en cualquier caso arroja un valor conservativo de la medida. Lo interesante de este método es que los errores siguen siendo menores que los cometidos para direcciones de 90° aun si se consideran separaciones de electrodos de 3.5L, aunque en este caso deben considerarse los errores para coeficientes de reflexión negativos, que pueden llegar a ser del mismo orden.

De la misma forma como usualmente existe alguna medida de resistividad del terreno previa a la construcción de la malla, se puede anticipar la existencia de estas discontinuidades y utilizar la curva θ(k) que aun en forma aproximada mejora notablemente los errores, figura 8

Figura 8 Angulo θ de valor del potencial igual a R para Lp=Lc como promedio de valores h, para el caso del ejemplo 3b con Lc=3.5L en función del coeficiente de reflexión

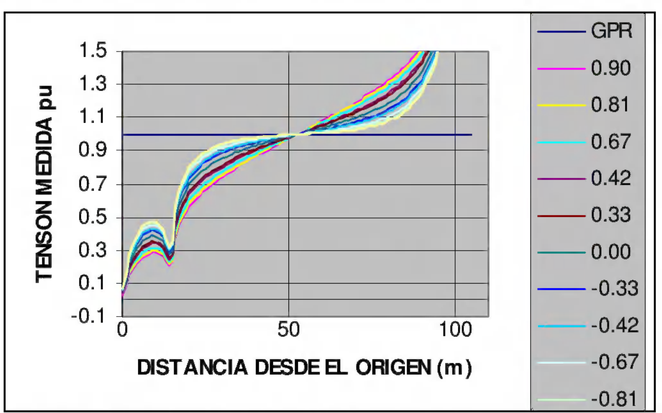


Figura 9 Perfil de potenciales sobre el segmento de recta que une el centro de la malla con el electrodo de corriente, valores por unidad del valor R-Rm

V METODO DE MEDIDA INDIRECTA

Consiste en medir la resistencia R-Rm a través de la medida de perfiles de potencial o por medida directa en alguno de los puntos P y adicionarle un valor de Rm realizando medidas adicionales con dos electrodos auxiliares de corriente.

A MEDIDA INDIRECTA DE LA RESISTENCIA

La medida de la resistencia de puesta a tierra (R-Rm) es más sencilla de medir que la de R, de forma que es posible estimar o medir el valor de Rm y adicionarlo al valor medido. El valor (R-Rm) es más fácil de encontrar ya que es aproximadamente independiente del valor del coeficiente de reflexión (k) y de la profundidad de la segunda capa (h).

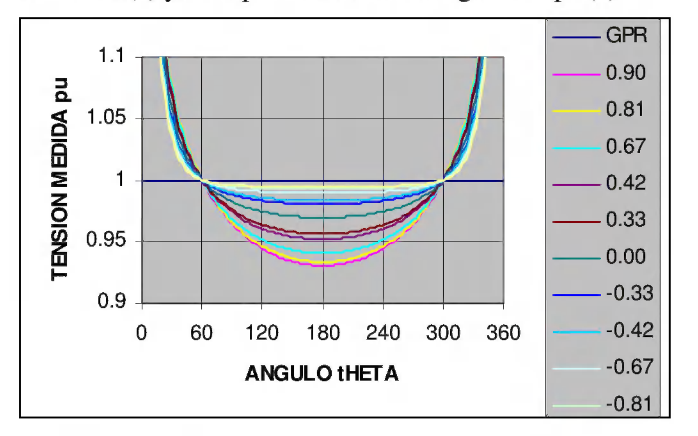


Figura 10 Perfil de potenciales sobre la circunferencia de radio Lc con centro en el centro de la malla, valores por unidad del valor R-Rm

El punto de corte con la línea que une el electrodo a medir con el electrodo de corriente se da ahora para el 50% de la distancia (en lugar de 62%) y coincide además con un punto de inflexión de la curva.

Si se utiliza la distancia Lc ahora el ángulo es 60° en lugar de aproximadamente 30°. En esas condiciones para cualquier distancia de separación de los electrodos y para cualquier terreno no homogéneo, la medida (a Lc y 60° o para 0.5Lc y 0°) presenta error cero. Deberá entonces agregarse el valor de la resistencia mutua para completar el valor de R.

La gráfica 10 muestra los perfiles de potencial calculados para el segmento que une el centro de la malla con el electrodo de corrientes para distintos valores del coeficiente de reflexión para el electrodo 3b. Como puede observarse el punto de corte está, en todos los casos para 0.5Lc.

La figura 11 muestra el perfil de potenciales para un círculo de centro en el centro de la malla y radio Lc, también para distintos valores del coeficiente de reflexión, para el electrodo 3b. En todos los casos el corte con el valor “1” ocurre para ángulos de 60° y 300°, siendo independiente del coeficiente de reflexión.

B ESTIMACION DE LA RESISTENCIA MUTUA

El valor de la resistencia mutua entre los electrodos es muy aproximado al potencial que crea el electrodo de corriente en el punto centro de la malla. Se han calculado las resistencias mutuas para los tres electrodos considerados y se han comparado con los valores del potencial en el centro de la malla para distintos valores de resistividad. En todos los casos la diferencia es menor que 7% del valor calculado de la resistencia mutua, lo que representa, en el caso de medida con mayor error, solamente un dos por ciento de la resistencia a medir.

A los efectos de poder estimar el valor de la resistencia mutua se ha considerado realizar la medida del perfil de potenciales entre dos electrodos iguales al electrodo de corriente separados una distancia de 3.5L (105m en este caso). La figura 13 nos muestra un conjunto de gráficas que muestran el perfil de potenciales de estos electrodos para distintos coeficientes de reflexión y para diferentes profundidades de la segunda capa. En estas curvas se han normalizado los potenciales dividiendo por el valor de la tensión del terreno a una distancia L(30m) del electrodo más próximo y en la semirecta que no contiene al otro electrodo. De esta forma se debe tomar los valores medidos en el campo, dividirlos por el valor medido a la distancia 30m del electrodo y se superpone la curva medida con las curvas de la gráfica y se selecciona la que más se aproxima. Posteriormente se selecciona de la tabla IV el valor de la distancia a la que se desea calcular la resistencia mutua en filas, se ubica la curva seleccionada en columnas y el valor de la tabla se multiplica por el cociente calculado previamente.

Los valores de gráfica están multiplicados por 100.

VI MALLADOS NO SIMETRICOS

Se ha seleccionado un mallado en forma de “L” el que se muestra en la figura 3d y que está formado por conductores enterrados a 0.5 m de profundidad con conductores de 0.01 m de diámetro, siendo la diagonal de un rectángulo que lo contenga uniendo los vértices de 30m.

Se han realizado los cálculos con dos ubicaciones del electrodo de corriente (C1 y C2), ambas simétricas respecto al “centro de la malla” de modo que la distancia real a los electrodos es diferente en ambos casos Figura 3d. Se ha realizado el cálculo de errores para ubicación de los electrodos de potencial en las ubicaciones de +/- 90°, +/-30°, 180° y 62°, a los efectos de considerar la diferencia de errores debida a la falta de simetría de la malla. Los errores se muestran en las tablas I y II, donde se han seleccionado dos casos, el primero para coeficiente de reflexión k=0.33 y h-d=15m y el segundo para k=0.9 y h-d=30m. En ambos casos la separación con el electrodo de corriente es 3.5L. La diferencia en cada caso afecta apenas en 2% para separación de electrodos de 3.5L. Los errores son de todos modos mayores que para el caso 3b en que el mallado es constructivamente similar pero que abarca mayor área.

TABLA I

	30°	18°	62%	90	180
ERROR A 30 GRADOS + 105 DIRECCIÓN POSITIVA	-1	6	-1	-9	-12
ERROR A 30 GRADOS + 105 DIRECCIÓN NEGATIVA	-1	6		-10	
ERROR A 30 GRADOS - 106 DIRECCION POSITIVA	-2	5	-3	-10	-12
ERROR A 30 GRADOS - 106 DIRECCION NEGATIVA	-2	5		-10	

TABLA II

	30°	18°	62%	90	180
ERROR A 30 GRADOS + 105 DIRECCIÓN +	-19	-13	-19	-26	-27
ERROR A 30 GRADOS + 105 DIRECCIÓN -	-19	-13		-26	
ERROR A 30 GRADOS - 106 DIRECCION +	-19	-13	-18	-25	-26
ERROR A 30 GRADOS - 106 DIRECCION +	-19	-13		-25	

De los valores de las tablas puede inferirse que las variaciones introducidas por la falta de simetría de la malla no afectan de forma sensible los errores calculados.

Las conclusiones generales referentes a los menores errores cometidos para medidas a 30° y 20° se mantienen con menores diferencias.

VII INFLUENCIA DEL ACOPLAMIENTO ENTRE CIRCUITOS DE CORRIENTE Y TENSION

Se ha considerado el acoplamiento entre los electrodos de corriente y de tensión. Este acoplamiento depende de la longitud del conductor de tensión, de la longitud del conductor de corriente y del ángulo entre ellos. Pero depende además de la resistividad del terreno en que se encuentran realizadas las instalaciones.

Las fórmulas empleadas son las indicadas en la norma IEEE 81.2. Esta expresión es válida para terrenos uniformes, sin embargo ha sido utilizada para terrenos no homogéneos utilizando para la fórmula el valor de la resistividad de la capa superior. La expresión empleada supone que los conductores tienen un punto común, por lo que diverge si se supone θ=0 ya que no habría separación entre los conductores. Para este caso debe considerarse la

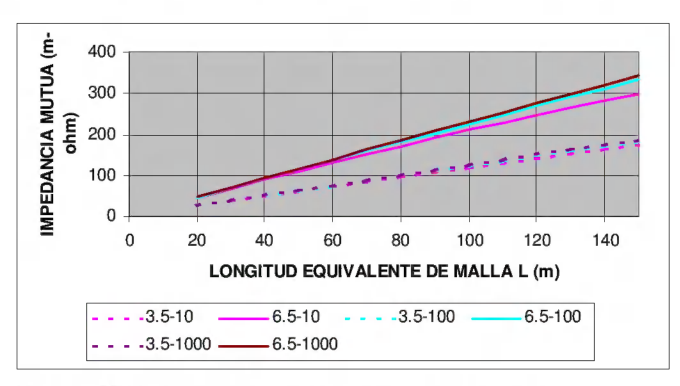


Figura 12 Valor de la impedancia mutua (modulo) parra Lp=Lc ángulo θ=0 para Lc=3.5L y Lc = 6.5L y para valores de resistividad superior 10, 100, 1000 Ω-m

distancia de separación entre conductores si se suponen paralelos. La fórmula empleada es válida para longitudes de los conductores menores que δ.

En los gráficos 11 y 12 y tabla III, se incluyen a título orientativo, valores en que la distancia Lc pueda ser mayor que δ. La tabla III muestra la influencia del acoplamiento de los conductores para diferentes valores de la distancia L. La resistencia de puesta a tierra depende fundamentalmente de la extensión de la malla, la que en este caso está representada por el parámetro L. Se ha considerado en la tabla un valor de resistencia del terreno estimado por la expresión (1), que da valores inferiores a los de la malla y por lo tanto conservativos. Sin embargo el valor mínimo se ha acotado en 0,1 debido a los efectos inductivos de la malla que no han sido considerados.

La resistencia del terreno depende fundamentalmente de los valores de la resistividad del terreno, la que se ha tomado como parámetro.

Como es natural para valores de resistencia de puesta a tierra muy bajos, que coinciden con mallas extensas en terrenos de baja resistividad el error puede llegar a ser importante.

Cabe destacar brevemente la recomendación de la medida a frecuencia industrial debido a la no linealidad de la reactancia y al aumento del acoplamiento. Indudablemente el acoplamiento es cero para medidas a 90° y es más importante a medida que disminuye el ángulo θ, siendo mayor para ángulo 0 que para 30° aunque la distancia del electrodo sea sesenta y dos por ciento de ésta si los conductores se encuentran próximos. De esta forma la disminución del error por la selección genérica del punto de medida a 30° puede ser compensada por el mayor error de acoplamiento en caso de que la resistividad de la capa superior sea tan baja como 10 Ω-m, ya que los errores en estos casos pueden alcanzar valores del 15%.

Las medidas a 20° aparecen como las mejores, ya que no solamente presentan errores menores en todos los casos de coeficientes de reflexión altos, sino que para valores bajos generan errores de signo opuesto que se compensan con

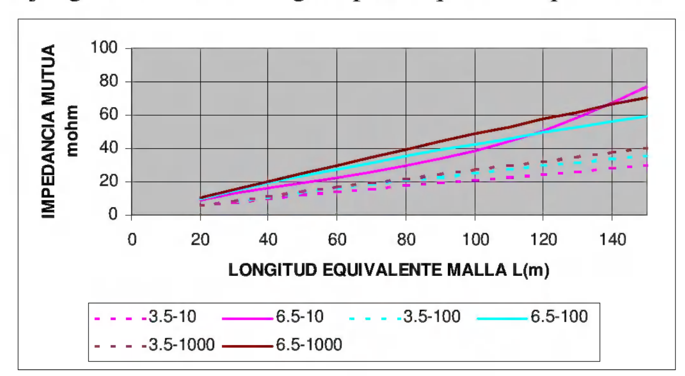


Figura11 Valor de la impedancia mutua (modulo) parra Lp=Lc ángulo θ=30° para Lc=3.5L y Lc = 6.5L y para valores de resistividad superior 10, 100, 1000 Ω-m

los errores por acoplamiento inductivo que tienden a indicar valores menores que los reales.

VIII CONCLUSIONES

En determinados tipos de terrenos de alta resistividad de las capas inferiores, los métodos de medida de resistencia de puesta a tierra estudiados arrojan resultados con errores teóricos elevados. En general el método de medida a 20° aparece con ventajas considerando todos los casos de medida directa.

Se ha indicado un método de medida indirecta que permite determinar rápidamente cual es el valor de la resistencia a medir y que aparece como el mejor si se pueden realizar las medidas adicionales que permitirán determinar la resistencia mutua entre el electrodo a medir y el electrodo de corriente disponiendo de los medios de cálculo adecuados.

En los casos de diseños geométricos de la malla muy diferentes a los considerados se hace necesaria la utilización de programas de cálculo para conocer en forma previa a la ejecución de la medida cuales son los puntos donde ésta debe realizarse.

REFERENCIAS

[1] IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and earth Surface Potentials of a Ground System Std 81 1983

[2] IEEE Guide For Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconected Grounding Systems. Std 81.2-December 5, 1991.

[3] Grounding Resistance Measurement Using Fall-of-potential Method with Potentian Probe Located in Opposite Direction to the Current Probe. C. Wang, T Takasima, T Sakuta, Y Tsubota. IEEE PWDY OCTOBER 1998 V13 N4 PP1128-1135

[4] G F Tagg ,Earth Resistances (texto)

[5] Manual AEMC de medida de resistencia de puesta a tierra y resistividad.

[6] M Andrade Cálculo de potenciales en mallas de tierra. CIER, SDEE, Viña del Mar, Chile, 1987. Revista de INGENIERIA Nro 2, 1989.

[7] M Andrade, "Estudio de potenciales en terrenos de cos capas inclinadas". 3er ERLAC (CIGRE), Fox do Iguazu, Brasil, 1989.

[8] M Andrade – D Slomovitz, "Grounding grid design for substations and distribution lines", I SIDEE, Belo Horizonte, Brasil, 1990.

[9] M Andrade, T Di Lavello "Especificaciones para puestas a tierra en los sitemas de electrificación rural con retorno por tierra". 12 CLER, Guatemala, 1989

TABLA III

30°		Lc=3.5L				Lc=6.5L		
L(m)	rho (ohm-m)	R (ohm)	Rm (m-ohm)	Xm (m ohm)	E%	Rm (m-ohm)	Xm (m ohm)	E%
30	10	0.31	0.89	7.49	0.32	3.06	12.50	1.1
60	10	0.20	3.55	13.21	1.94	12.26	18.87	6.4
90	10	0.17	8.00	17.14	5.20	27.58	19.11	16.8
30	100	2.19	0.28	8.10	0.01	0.97	14.59	0.0
60	100	1.14	1.12	15.64	0.11	3.88	27.25	0.4
90	100	0.80	2.53	22.61	0.36	8.72	37.97	1.2
30	1000	20.99	0.09	8.29	0.00	0.31	15.26	0.0
60	1000	10.54	0.36	16.40	0.00	1.23	29.90	0.0
90	1000	7.06	0.80	24.34	0.01	2.76	43.93	0.0
180		Lc=3.5L				Lc=6.5L		
30	10	0.21	-1.03	-1.26	-0.49	-3.54	-0.71	-1.7
60	10	0.10	-4.10	-0.47	-3.93	-14.15	5.66	-13.4
90	10	0.07	-9.23	2.37	-13.19	-31.84	19.11	-39.2
30	100	2.09	-0.32	-1.96	-0.02	-1.12	-3.13	-0.1
60	100	1.04	-1.30	-3.28	-0.12	-4.48	-4.02	-0.4
90	100	0.70	-2.92	-3.94	-0.42	-10.07	-2.67	-1.4
30	1000	20.89	-0.10	-2.18	0.00	-0.35	-3.89	0.0
60	1000	10.44	-0.41	-4.16	0.00	-1.42	-7.08	0.0
90	1000	6.96	-0.92	-5.94	-0.01	-3.18	-9.55	0.0



Marcos Andrade, nació en Montevideo, Uruguay en 1949. Recibió el título de Ingeniero Electricista en 1975.Actuó como docente de Electrotecnia y Proyecto de Ingeniería Eléctrica en la Facultad de Ingeniería.
Trabajó durante 24 años en Generación, Trasmisión y Distribución de Energía Eléctrica. Ha escrito varios artículos sobre puestas a tierra y protección de sistemas eléctricos de potencia.
Actualmente se desempeña como Ingeniero Asesor en Proyectos de Obra y Mantenimiento de Instalaciones de alta tensión. Es docente de la Universidad de Montevideo

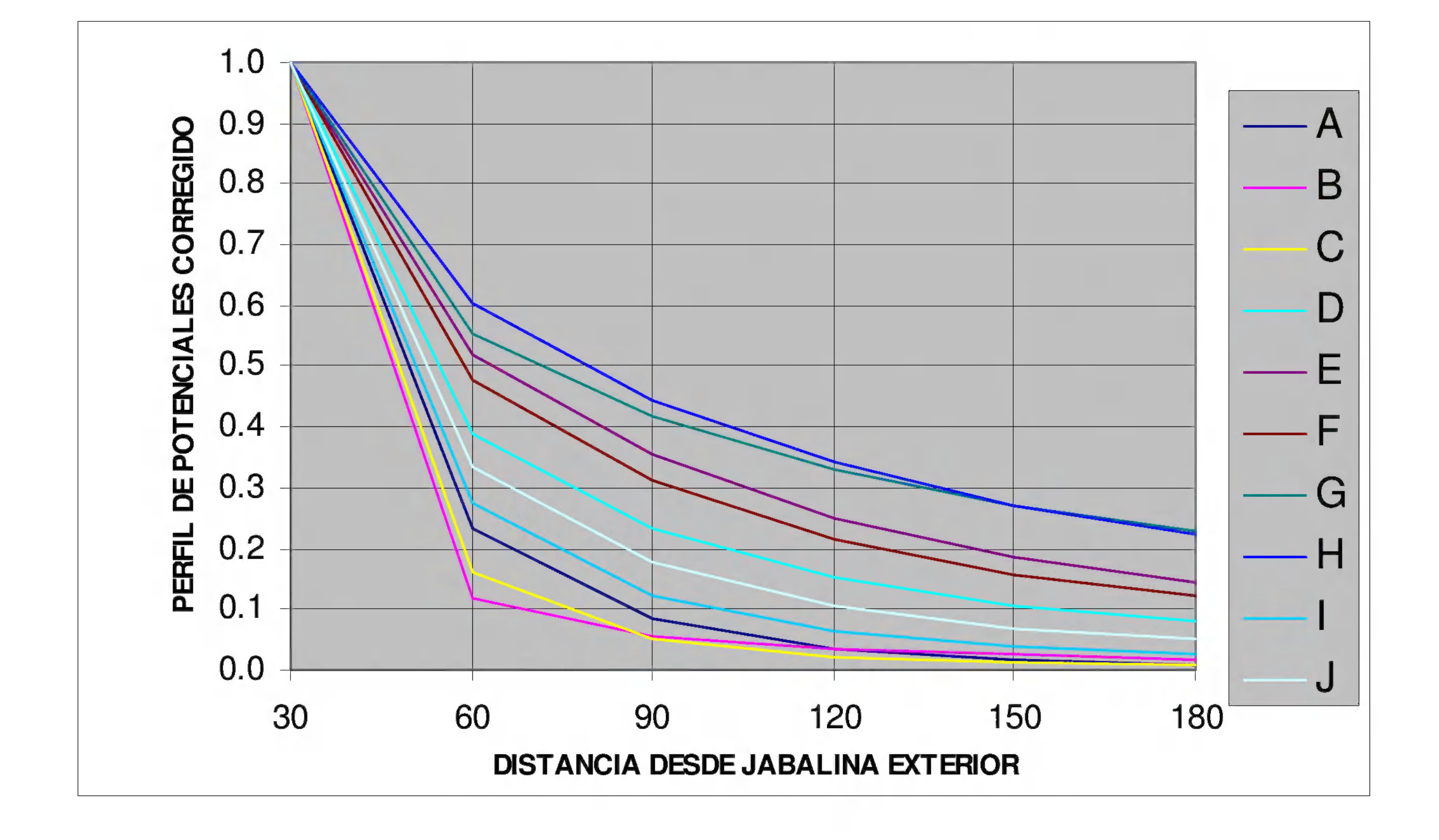


Figura 13 Perfiles de potencial para dos jabalinas, ajustado en valores por unidad

TABLA IV

	F	30	60	90	120	150	180
A	96.39	1.04	0.80	0.55	0.38	0.33	0.29
B	168.09	0.59	0.54	0.45	0.36	0.31	0.28
C	147.24	0.68	0.58	0.46	0.36	0.32	0.28
D	8.48	11.79	10.61	8.84	7.07	6.24	5.58
E	1.97	50.80	46.60	39.91	32.80	29.30	26.47
F	3.68	27.18	24.74	20.96	17.03	15.13	13.61
G	1.34	74.80	71.59	66.11	59.63	56.15	53.07
H	0.77	130.44	122.82	110.04	95.48	87.88	81.34
I	33.90	2.95	2.52	1.97	1.50	1.30	1.15
J	15.32	6.53	5.76	4.68	3.66	3.21	2.85

Tabla IV Valores para cálculo de la resistencia mutua